

キャビテーション気泡崩壊圧の計測

余 金宝* 岡田 庸敬** 岩井 善郎**

Measurement of Cavitation Bubble Collapse Pressure

Jinbao YU, Tsunenori OKADA, Yoshiro IWAI

(Received Aug.31,1983.)

This paper described the measurement of cavitation bubble collapse pressure generated from a electromagnetic vibrator. A sensor used for detecting bubble collapse pressure and data acquisition system were developed in our laboratory. The spectrums of cavitation bubble collapse pressure measured by this system were shown in this paper. It was clarified that the distribution of collapse pressures obeys Weibull's distribution.

1 まえがき

キャビテーション・エロージョンは流体機械、管水路などで多数の被害を与えているが、その対応策は非常に立ちおくれている。その原因は多くあるが、エロージョン面に作用する気泡崩壊圧（衝撃力）の実態を十分に把握できないことも一因である。一方、キャビテーション気泡崩壊圧は極めて小さい部分に、極めて短時間非常に高圧が作用するので、その計測はとても難しい。従来、気泡崩壊圧の計測は光弾性体上で気泡を崩壊させ、それを高速度カメラで撮影する方法¹⁾や、ピエゾ式圧力ピックアップ上に電気放電で半球形の気泡を作り、崩壊時の圧力を測定する方法²⁾などがあるが、それらの実験にはいろいろ問題があり、実際の浸食面に十分利用できるデータではない。一般に流体機械におけるキャビテーション・エロージョンの原因となる気泡崩壊圧は確率的現象であるから、キャビテーション被害の克服に関連して、キャビテーション・パラメーターに対する崩壊圧の時間的・空間的分布を統計的に解明することも重要である。

* 中国空間技術研究院

** 産業機械工学科

本研究では最近開発された高性能の圧電素子を用いて、圧力検出器を試作し、マイクロコンピュータによる計測システムを完成させて、磁歪振動装置におけるキャビテーション気泡崩壊圧を計測した。

2 実験装置および計測方法

2-1 磁歪振動装置

図1に衝撃圧力測定の実験装置を示す。キャビテーション気泡は共振周波数 14.5KHzの磁歪振動装置によって発生させた。図のようにキャビテーション気泡はホーン先端のディスク端面から発生する。ディスク端面の振幅は可変で、ディスクとセンサーの相対位置は水平調整ねじ及び垂直調整ねじで調節できる。ディスク面に発生したキャビテーション気泡群の一部は大きく成長して系外に、またはセンサー表面で崩壊する。他の部分は気泡の相互作用によって崩壊した。これらの崩壊によって発生した衝撃圧力はディスクの下に置かれたセンサーの受圧面積 3 mm^2 の受圧棒で検出された。

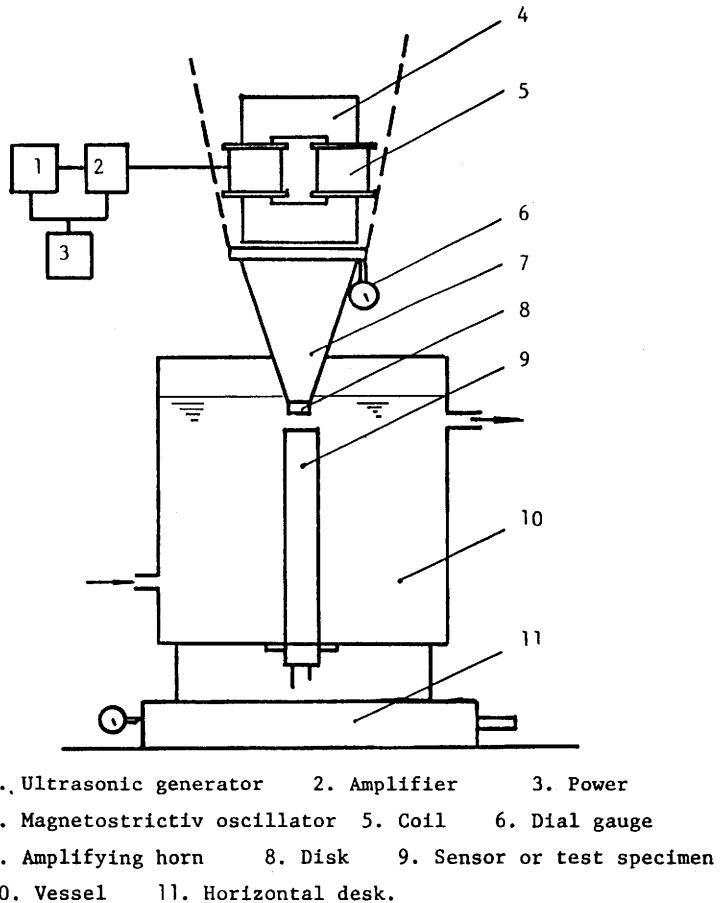


Fig.1 Testing apparatus

2-2 センサー

衝撃圧力検出のセンサーは、ステンレス鋼のケースと検出棒及び絶縁と防振のためのシリコン・ゴムから構成されている。センサーの構造を図2に示す。圧電素子は村田製作所製のP50/50-10型セラミック超音波振動子（ピエゾタイト）で、共振周波数は5MHzである。この圧電子の下面には銅棒が、上面にはステンレス鋼で製作した受圧棒が接着して、一体の検出棒を構成している。高効率に衝撃圧力を受けるために、受圧棒の形状はホーン状で、受圧面は直径 2 mm である。またこの受圧棒の高さは、実験で最後に決めて 14 mm である。銅棒の長さは圧力波の反射時間に大きい影響を与えるので長いほうがよい。表1に圧電素子の諸元を示す。

Table 1 Characteristics of sensor

1	Sensitive head diameter	2 mm
2	Rise time	2 μ s
3	Maximum allowable temperature	100 °c
4	Capacitance of ceramic	2210 pf
5	Density of ceramic	7.2 gm/cc
6	Resonant of frequency	5 mHz
7	Mechanical Q	230
8	Curie point	260

2-3 信号処理および計測システム

信号処理および計測システムを図3に示す。図4(a)はセンサーの出力電圧信号を直接トランジェントメモリーで記録した一例である。衝撃圧力はごく短時間(約数 μ s)発生し、磁歪振動装置の14.5 KHzの低周波上に重畳されている。振動子による14.5 KHz成分をハイパス・フィルタで除去すると、図4(b)のように、衝撃圧力みの波形が観察できる。この衝撃圧力波形を図4(c)に示すように、リセット信号が来るまでピークホールドし、A/D変換して、コンピュータで記録、処理する。使用したA/D変換器は8ビットで、マイクロコンピュータはMZ-80Bである。

文献によると、キャビテーション気泡崩壊時間は、単一気泡崩壊の測定例ではあるが、数 μ s程度である。また気泡崩壊圧力の発生頻度はキャビテーション強度によって異なるが、数KHz程度である。勿論コンピュータの記録速度はできるだけ早いほうがよい。一方A/D変換したデータをすべて記憶した後に演算処理すると記憶容量はMZ-80Bで1万データしか記憶できない。これは試験時間の数秒程度に相当する。外部記憶装置を使っても総記憶量は5万程度にしかない。そのうえデータの転送時間に約15秒を要し、連続して記憶させることができない。記憶したデータを計算するのに10分程度の時間を要し、多量の結果の統計処理には不向きである。そこで、コンピュータのサンプリング時間を100 μ s程度に設定して、図5に示すように、周期Tのうち、区間〔IN〕でA/D変換された出力をマイクロコンピュータに読み込み、区間〔OP〕で出力の処理をするようにすると、記憶容量は標本数Nに無関係になる。図5にこの実時間処理のフローチャートを示す。区間〔IN〕で、A/D変換器をスタートした後、抽出パルスの高さに応じてA/D変換された出力をコンピュータでカウント処理する。その後コンピュータからピークホールドへリセット信号を転送して、新たな周期が始まり、測定およびデータ処理が繰り返される。

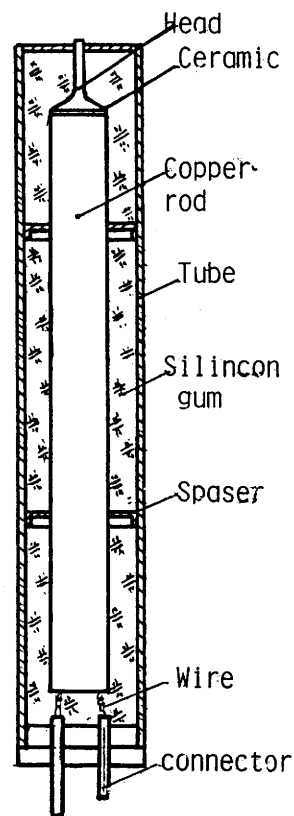


Fig.2 Construct of sensor

なお、処理時間を短縮させるために、プログラムはマシン語を用いた。本研究では、図6に示すようにA/D変換時間は約 $25\mu\text{s}$ で、読み込み時間とデータ処理時間はそれぞれ $33\mu\text{s}$ 、 $33\mu\text{s}$ である。

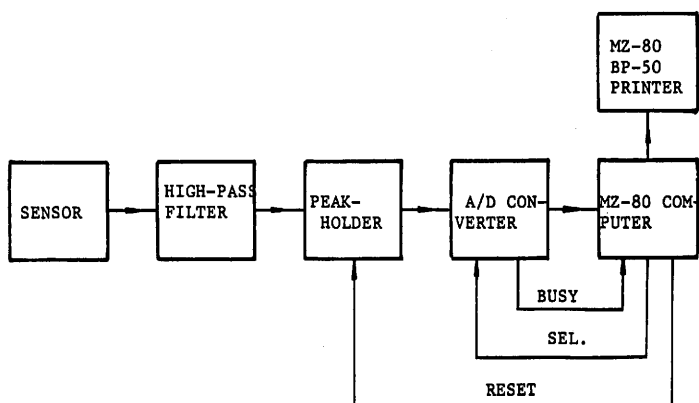


Fig.3 Acquisition system for measuring of bubble collapse pressure

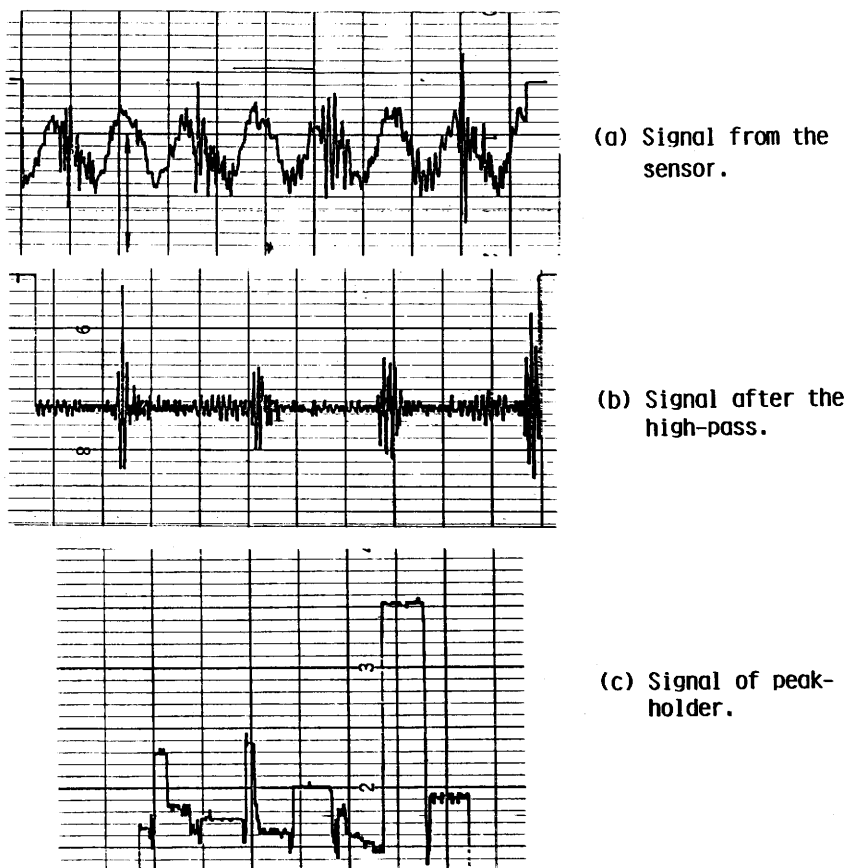


Fig.4 Typical signals from different points of acquisition system.

3 計 測 例

3-1 衝撃圧力のスペクトル

図7から図10は、水道水中(20℃)で、振幅(peak to peak) $A=40\mu\text{m}$ 、ディスク振動面からそれぞれ2, 3, 4, 5mm離れた位置で、ディスクとセンサーの中心が一致するようにして計測した衝撃圧力のスペクトルである。計測時間は5分間で、用いた座標系は片対数である。これを見ると、磁歪振動装置におけるキャビテーション気泡崩壊圧力のスペクトルは片対数座標上でほぼ直線になることがわかる。

3-2 衝撃圧力の確率分布

一般に、Weibull分布は次のように表わされる。

$$F(t) = 1 - \exp(-t^m / t_0) \quad (1)$$

ここで m , t_0 は常数である。

測定されたデータをWeibull 確率紙で示すと、図11から図14のようにデータが直線で示されることがわかる。すなわち、磁歪振動装置によって発生したキャビテーション気泡崩壊圧の確率分布はWeibull 分布に従っていることが認められる。

3-3 パルスのエネルギースペクトル

本計測システムでは、鋼球落下試験方法で検定した。パルス高さとエネルギーの関係は次のように表わされる。

$$E = \psi_e \cdot H^2 \text{ (Joules)} \quad (2)$$

ここで E はパルスのエネルギーで、 H はパルス高さである。 ψ_e は常数で、検定結果では

$$\psi_e = 1.723 \times 10^{-5} \text{ Joules}/H^2$$

になる。したがって、式(2)によって計測した圧力スペクトルはエネルギースペクトルに換算できる。

図15は、すきま $H=2, 2.5, 3 \text{ mm}$ の場合の衝撃圧エネルギースペクトルである。また、図16, 図17は同じ条件で浸食試験を行った場合の純アルミニウムの壊食量結果である。

力学的原因として、材料壊食は大きな単気泡が直接材料表面で崩壊する場合と、多数の低エネルギーの気泡が材料表面で崩壊して材料表面を疲労させる場合とが考えられる。³⁾⁴⁾ したがって、エネルギーの観点から材料表面に損傷を与える衝撃圧の下限界値を求めてみた。図15と図17によって、純アルミニウムのキャビテーション・エロージョンを与える下限界値は、附録に述べる方法で推算する

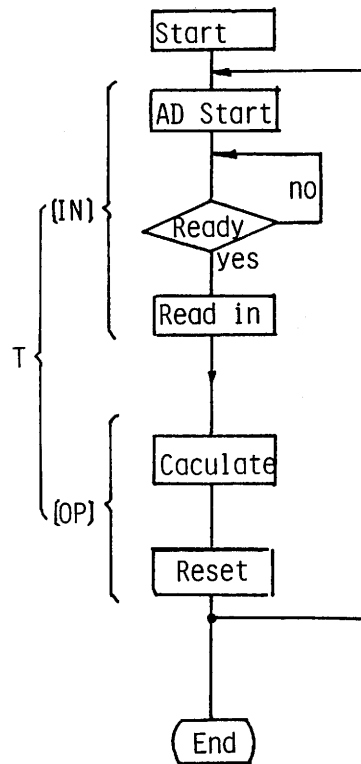


Fig.5 Flow chart

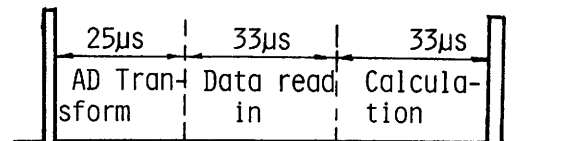


Fig.6 Time signal.

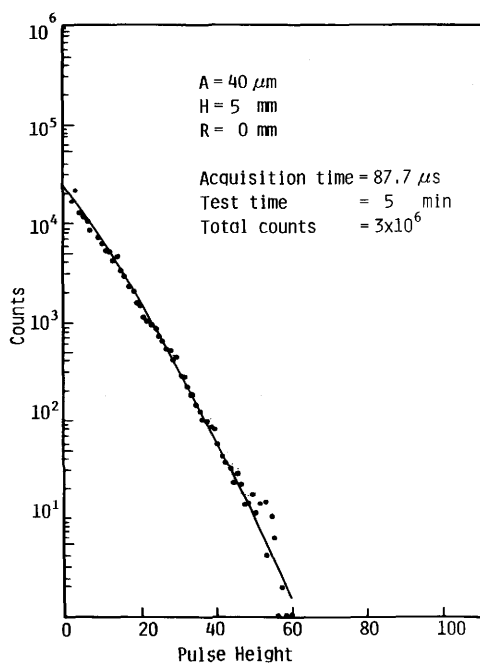


Fig.7 Pulse Height Spectrum

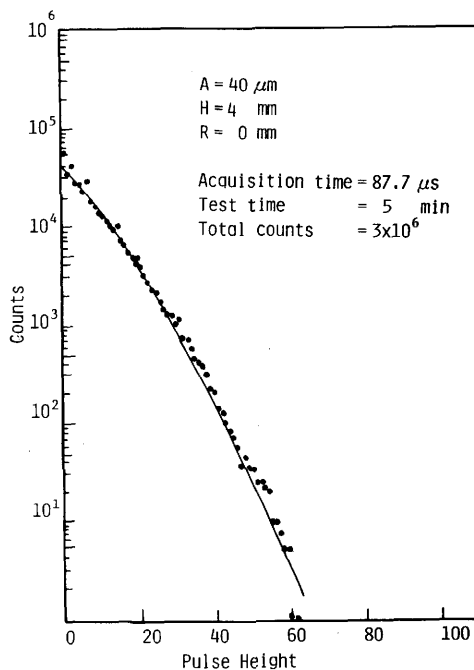


Fig.8 Pulse Height Spectrum

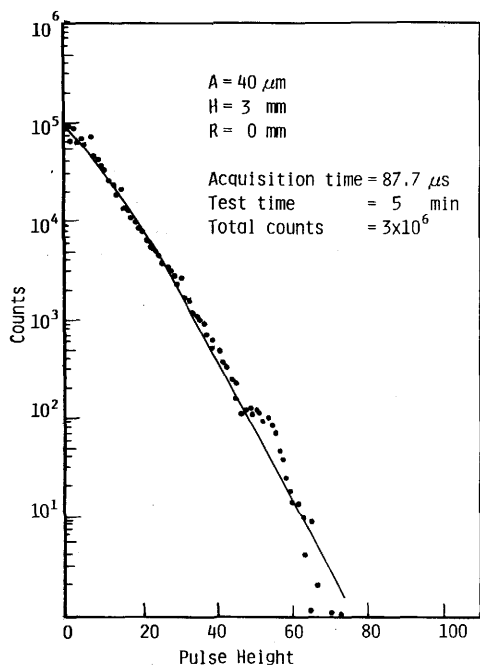


Fig.9 Pulse Height Spectrum

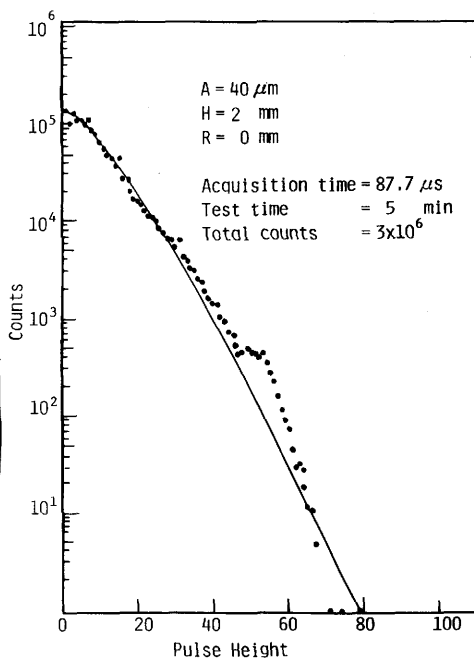


Fig.10 Pulse Height Spectrum

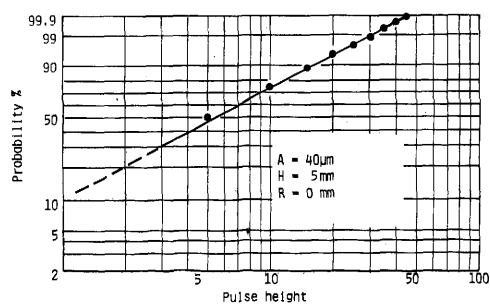


Fig.11 Weibull's distribution
of pulse

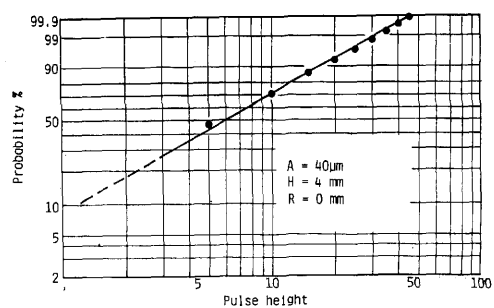


Fig.12 Weibull's distribution
of pulse

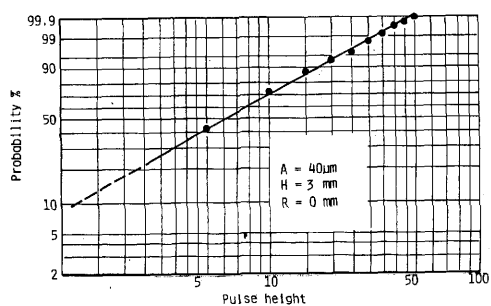


Fig.13 Weibull's distribution
of pulse

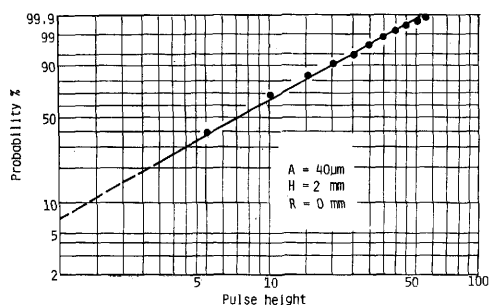


Fig.14 Weibull's distribution
of pulse

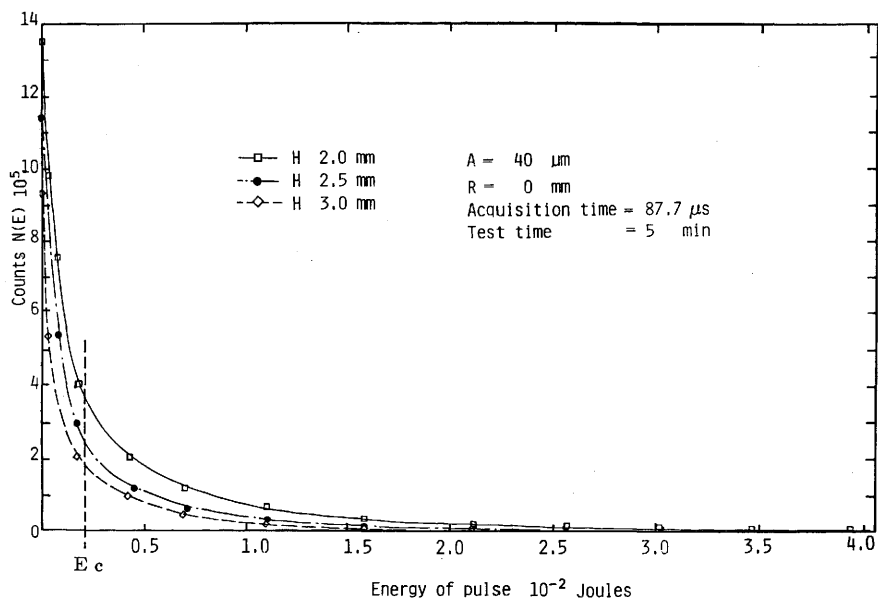


Fig.15 Pulse energy spectrum.

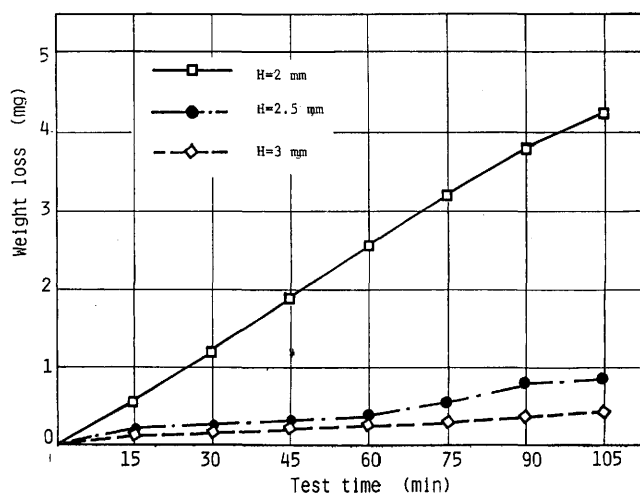


Fig.16 Weight loss curve of pure aluminium.

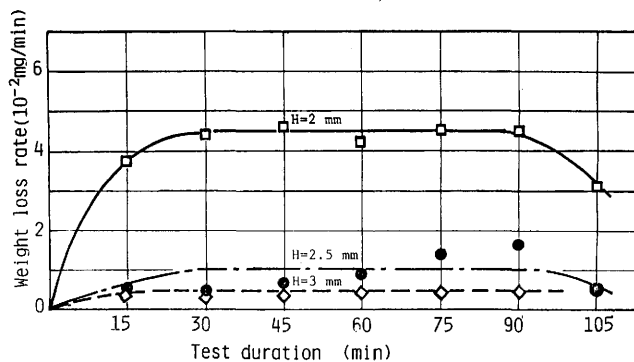


Fig.17 Weight loss rate of pure aluminium.

ことができる。図15に推算した結果を点線で示した。

4 む す び

磁歪振動装置におけるキャビテーション気泡崩壊圧力の実態を把握するために、高性能の圧電素子を用いた、圧力検出器に試作し、マイコンによる実時間処理の計測システムを開発した。本計測システムは基礎研究の手段としてのみでなく、既存流体機械に流体の瞬間的なパルス型の圧力計測や開発にも広く応用できる。また、測定例では圧力スペクトルや確率分布などの結果を得た。これらの結果はキャビテーション気泡核の確率分布の基礎研究の参考になると思う。

5 謝 辞

本研究は昭和57年1月から昭和58年3月の期間、昭和56年度日本文部省国費外国人留学生として、福井大学工学部産業機械工学科においてなされたものである。本留学を許可していただいた日本文部省ならびに福井大学に感謝の意を表します。また留学の機会を与えていただいた中国空間技術研究院に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sutton, G.W., Tran ., ASME 24, 3 (1957)
- 2) Hammit, F. G., Cavitation and Multiphase Flow Phenomena. (1981), 78 McGraw-Hill.
- 3) 遠藤, 岡田, 馬場, 機械学会論文集 34, 267, (1968), 1831
- 4) Stinebring, P. R., J. Fluids Engineering, 102, 12, (1980), 481.

附 録

エロージョンの下限界値の推算

一般に、エロージョン速度と音波の Acoustic power の関係は次のように表わされる。

$$Rat = C \cdot Pac^n \quad (0-1)$$

ここでC及びnは材料によって決定される常数、Ratはエロージョン速度、PacはAcoustic powerである。一方、単位面積当りの平均Acoustic powerは次のように表わされる。

$$Pac(Ec) = \frac{1}{Ts \pi r_{se}^2} \int_{Ec}^{Em} N(E) dE \quad (0-2)$$

ここで、Tsは実験時間、rseはセンサーの受圧面半径、N(E)は図15に示すようにパルスのエネルギースペクトル、Em、Ecはそれぞれ上限値と下限値である。

すきまH=2, 2.5, 3 mmに応じて、次の3つ式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} Rat^{(2)} &= C \cdot Pac^{(2)} (Ec)^n \\ Rat^{(2.5)} &= C \cdot Pac^{(2.5)} (Ec)^n \\ Rat^{(3)} &= C \cdot Pac^{(3)} (Ec)^n \end{aligned} \right\} \quad (0-3)$$

上の3つの方程式の中で、C、n及びEcは未知数である。(0-3)式から変換すると、次の

(0-4)式が得られる。

$$\text{Rat}^{(2.5)} / \text{Rat}^{(2)} = [\text{Pac}^{(2.5)}(E_c) / \text{Pac}^{(2)}(E_c)]^n \quad (0-4)$$

$$\text{Rat}^{(3)} / \text{Rat}^{(2)} = [\text{Pac}^{(3)}(E_c) / \text{Pac}^{(2)}(E_c)]^n$$

これから、次の(0-5)式が成立する。

$$n = \frac{\ln \text{Rat}^{(2.5)} - \ln \text{Rat}^{(2)}}{\ln \text{Pac}^{(2.5)}(E_c) - \ln \text{Pac}^{(2)}(E_c)} \quad (0-5)$$

$$n = \frac{\ln \text{Rat}^{(3)} - \ln \text{Rat}^{(2)}}{\ln \text{Pac}^{(3)}(E_c) - \ln \text{Pac}^{(2)}(E_c)}$$

図15より $\text{Pac}(E_c)$ 、図17より Rat を求めて、(0-5)式より n 、 E_c の関係を求めると、附図a のようになる。これより交点の n における E_c を求めてキャビテーション・エロージョンに対する下限値とした。

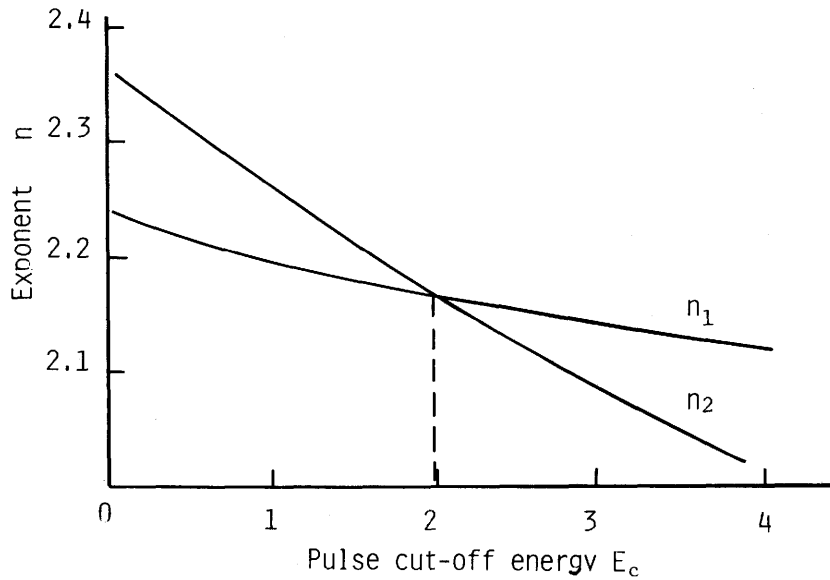


Fig.a Variation of exponent n with cut-off energy of pulse.